Zur Phasenänderung des Lichtes bei der Reflexion an Metallen.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VON DER PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT

DER

FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

GENEHMIGT

UND

NEBST DEN BEIGEFÜGTEN THESEN

ÖFFENTLICH ZU VERTEIDIGEN

AM 17. MÄRZ 1897

VON

Hubert Kath

aus Stargard in Pommern.

Hr. Drd. med. F. Chop.
- Dr. phil. E. Koebke.
- Dr. phil. M. Weber.

BERLIN

DRUCK VON E. EBERING (C. VOGTS BUCHDRUCKEREI)

Linkstrasse 16.

Meinen Eltern.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535723_0237

Vorbemerkung.

Die vorliegende Untersuchung wurde angeregt durch eine Aufgabe der Philosophischen Fakultät der Universität Berlin über die Messung der Phasenänderung, welche die parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Komponenten des Lichtes einzeln bei der Reflexion an Metallen erleiden. Da die damals von mir in einer kleinen Arbeit erzielten Resultate Beifall fanden, habe ich mich bemüht umfangreichere Untersuchungen anzustellen, die ich hier zugleich mit den früheren veröffentliche. Das überaus freundliche Entgegenkommen des Herrn Prof. Dr. Rubens ermöglichte es mir, in dem damals von ihm geleiteten Berliner Physikalischen Institut diese Beobachtungen zu vollenden, und ich erfülle gerne die Pflicht, ihm hier meinen Dank auszusprechen.

I. Frühere Arbeiten und Wahl der Methode.

Die Bestimmung der Phasenänderung, welche die parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Komponenten des Lichtes bei der Reflexion an Metallen erleiden (absolute Phasenänderung nach Wernicke),[1] ist schon vielfach versucht worden. Es darf hier von einer eingehenden Besprechung der gesamten diesbezüglichen Literatur abge-

---

1. Vgl. Ann. Pogg. 159 Seite 198.

sehen werden, da dieselbe in dem „Handbuche der Physik“[1] eine umfassende Darstellung gefunden hat, nur die neueren Arbeiten mögen, weil sie von näherem Interesse für das Folgende sind, hier noch einmal erwähnt werden.

Die früheren Arbeiten haben durch viele vergebliche Versuche zu dem Ergebnis geführt, dass zur Darstellung der Interferenzen, durch welche man die Phasenänderung erkennbar machen will, nur die Methode der dünnen Blättchen von Erfolg zu sein scheint; das heisst, man muss die Interferenzen benutzen, welche durch Reflexion des Lichtes an der betr. Metalloberfläche und an einer dicht darüber befindlichen Grenzfläche zweier durchsichtigen Medien (Glas und Luft) entstehen. Die drei hier möglichen Methoden: Newtonsche Ringe, Interferenzen planparalleler Blättchen spektral untersucht, Interferenzen schwach keilförmiger Blättchen, sind dann auch thatsächlich neuerdings erfolgreich angewandt worden.

Mit Newtonschen Ringen hatte zuerst Herr Glan[2] brauchbare Resultate erzielt, indem er dieselben zwischen einem Metallspiegel und einer aufgelegten Glaslinse herstellte und mit dem Mikroskop beobachtete. Von Metallen[3] untersuchte er zunächst Stahl, wo seine Beobachtungen von 20^0 bis 65^0 Incidenz eine ziemlich glatt verlaufende Kurve ergeben, die mit einer Beschleunigung von 0,41 bis ca. 0,48 gleichbedeutend ist. — Herr Glan giebt die Werte als Verzögerungen. — Bei Silber wurden dagegen die Beobachtungen infolge des sanfteren Ueberganges der Maxima in die Minima so schwierig, dass die Werte nur die Zehntel Wellen-

---

1. Vgl. Handbuch der Physik von Winkelmann, II. Bd. 1. T. S. 827 ff. (Drude).

2. Ann. Pogg. 155 S. 258; Ann. Wied. 7 S. 640, 47 S. 253.

3. Ann. Wied. 7 S. 654 u. f., übrigens nur an parallel polarisiertem Licht.

längen einigermassen sicher geben, nämlich bei 20° Incidenz ca. 0,3 und bei 80° ca. 0,45 Beschleunigung. Ausserdem beobachtete aber Herr Glan als erster eine Veränderung der Beschleunigungen mit der Wellenlänge, in dem die Beschleunigung von 0,38 im Rot bis zu 0,34 im Indigo abnahm (am Stahlspiegel gemessen): also eine Abnahme von ca. 0,01 auf 0,1 μ.

Herr R. Hennig[1] erhielt dagegen mit derselben Methode so wenig befriedigende Resultate, dass er dieselbe für ungeeignet erklärt. Es sind in der genannten Arbeit je zwei Messungsreihen an zwei Stahlspiegeln mitgeteilt, die allerdings recht abweichende Werte zeigen und im Mittel nur etwa die Zehntel Wellenlängen richtig geben. Es muss aber dabei bemerkt werden, dass Herr Hennig nicht — wie Herr Glan — nur die ersten beiden Ringe, welche genauere Werte geben als eine grössere Zahl, zur Messung benutzt hat, und dass die in derselben Arbeit veröffentlichte bis auf Tausendstel genaue Messung der elliptischen Polarisation ihn vielleicht zu hohe Erwartungen in Bezug auf die genannten Beobachtungen hegen liess.

Da wir im Folgenden sehen werden, dass man bei allen Messungen der absoluten Phasenänderung 1 % einer Wellenlänge als recht gute Genauigkeit bezeichnen darf, und da Herr Glan dieser Grenze nahe kommt, darf die Methode wohl weiter als geeignet gelten. Herr Wernicke hat dann die Interferenzen dünner paralleler Schichten zur Messung der Phasenänderung benutzt,[2] indem er ein Bündel paralleler Lichtstrahlen (meist natürliches, in manchen Fällen polarisiertes Licht) an einer dünnen Schicht von Blättchen sehr verschiedenen Materials reflektieren liess, und dann durch einen Spalt, dessen Spektrum er mit Fernrohr und Prisma beobachten konnte, einen schmalen Streifen heraus-

1. Göttinger Nachrichten 1887 S. 366.
2. Ann. Pogg. 159 S. 198. Ann. Wied. 25. S. 203.

schnitt. Er hat so viele Vergleiche mit der Reflexion an Licht ausgeführt, indem er die zu untersuchende Substanz hinter dem Blättchen in der mittleren Spalthöhe in Luft übergehen liess und dadurch auch im Spektrum den entsprechenden Uebergang der Streifen bekam. So erhielt er für die Reflexion an Silber in Glas[1] eine Beschleunigung von $^1/_4$ Wellenlänge. Die Genauigkeit der Methode lässt sich schwer beurteilen, da eine ausführlichere Zahlenangabe fehlt, nur einmal wird eine Ablesung auf $^1/_{30}$ Wellenlänge, also auch hier auf Prozente garantiert.[2]

Den wertvollsten Beitrag zu einer Messung der Phasenänderung hat dann Herr Drude[3] geliefert, indem er nicht nur durch eine grössere Zahl von Beobachtungen einen verhältnismässig genauen Mittelwert erzielte, sondern zugleich durch Veröffentlichung der Berechnungen einen Einblick in die Genauigkeit gab. Herr Drude wählte die dritte Art der Benutzung von Interferenzen dünner Blättchen, indem er schwach keilförmige Luftschichten oder ebensolche Glasblättchen verwandte und deren Interferenzen bei Beleuchtung mit Natriumlicht durch ein Fernrohr beobachtete. Es sind in dieser Arbeit nur chemisch niedergeschlagene Spiegel und nur beim Einfallswinkel 0^0 untersucht, und die Untersuchung geschah stets so, dass man auf einer Stelle des Spiegels die Silberbelegung wegkratzte und nun Interferenzen der Reflexion an der freien Stelle mit der an Silber vergleichen konnte. Solange die Glasblättchen das Medium sind, hinter welchem Luft-Reflexionen mit Silber-Reflexionen verglichen werden, ist dies verhältnismässig einfach, kratzt man dagegen die Silberbelegung einer dickeren Platte streifenweise fort und erzeugt durch Aufdecken einer zweiten Platte eine dünne Schicht Luft, so hat man am „Luft-“ und am „Silber-

1. Ann. Pogg. 159 S. 220.
2. Ann. Pogg. 259 S. 204.
3. Ann. Wied. 50 S. 595; 51 S. 577.

streifen“ zwei verschiedene Dicken und es wird eine Dickenbestimmung der Silberschicht nötig, die in diesem Falle durch Verwandlung in Jodsilber und durch die gleiche Interferenzmethode erfolgte.

Es sind in dieser Arbeit[1] in ausführlicher Weise grössere Zahlenreihen gegeben, welche die Genauigkeit der Beobachtungen deutlich erkennen lassen; so enthalten die Resultate über die Reflexion in Luft 9 Beobachtungen an 5 Spiegeln; für die Reflexion in Glas liegen 9 Zahlen vor. Berechnet man nach der Methode der kleinsten Quadrate die Fehlergrenzen, so ergiebt sich ein mittlerer Fehler der Einzelwerte von 2—3% und des Mittelwertes von ca. 1% einer Wellenlänge. Diese Zahlen zeigen im Verein mit den früher genannten, dass bei allen Interferenzen dünner Blättchen die Genauigkeit der Ablesung bei sorgfältiger Ausscheidung aller Fehlerquellen annähernd dieselbe ist, nämlich etwas besser als 3% einer Wellenlänge. Ob diese Abweichungen allein Ablesungsfehler sind, oder ob sie auch durch die Struktur der Spiegel bedingt sind, ist bisher noch nicht aus den Beobachtungen zu ersehen.

Man kann nun eine Methode zur Bestimmung der absoluten Phasenänderung auf folgender Betrachtung aufbauen, welche sich auf die Beobachtung der spektralen Interferenzen planparallerer Blättchen in polarisiertem Licht stützt

Setzt man die Dicke der dünnen Schicht = d,
ihren Brechungsexponenten = ν_λ,
die Wellenlänge des Interferenzminimums = λ (in Luft),
den Einfallswinkel = e,
die Beschleunigung an der vorderen Fläche = P(v)
„ „ „ „ hinteren Fläche = P(h),
so besteht für das Minimum von der Ordnungszahl n die bekannte Beziehung

---

1. Ann. Wied. 50 S. 611.

$$\frac{2d\ \nu_\lambda\ \cos e}{\lambda_n} = n + {}^1/_2 - P(v) + P(h).$$

Für Luft als Medium des dünnen Blättchens wird nun

$$\nu_\lambda = 1,$$

sodass für $n = 1,2,3 \ldots .$ nur noch die Werte der λ_n und vielleicht der P sich ändern.

Über das Vorzeichen der Glieder P gilt dabei folgende Betrachtung. Hat man die Gleichung

$$\frac{2d \cos e}{\lambda} = n + {}^1/_2$$

also keine Phasenänderung und fügt rechts ein positives P hinzu, so würde man durch eine gleichzeitige Vergrösserung von d wieder das Gleichgewicht herstellen können. Ein positives P ist also gleichwertig einer Verkleinerung der Dicke d, also gleichwertig einer Verzögerung an der Vorderfläche oder einer Beschleunigung an der Hinterfläche des Blättchens, sodass in der Formel beide P als Beschleunigungen angesetzt sind.

Sehen wir nun zunächst von der Veränderlichkeit des P mit der Wellenlänge ab, so ergeben sich für verschiedene Ordnungszahlen die Gleichungen:

$$2d \cos e \cdot \frac{1}{\lambda_{n-1}} = (n-1) + \frac{1}{2} - P(v) + P(h)$$

$$2d \cos e \cdot \frac{1}{\lambda_n} = n + \frac{1}{2} - P(v) + P(h)$$

$$2d \cos e \ \frac{1}{\lambda_{n+1}} = (n+1) + \frac{1}{2} - P(v) + P(h)$$

Die Werte $\frac{1}{\lambda}$ steigen also jedesmal um den gleichen Betrag nämlich $\frac{1}{2d \cos e}$, wenn n um Eins wächst.

Hierdurch ist es möglich, aus den reciproken Wellenlängen der aufeinanderfolgenden Streifen, deren Ordnungszahl übrigens noch nicht bekannt ist, nach der Methode der kleinsten Quadrate (2 d cos e) oder dessen reciproken Wert direkt zu berechnen, ohne dass man z. B. durch Wegkratzen der Silberbelegung erst besondere Werte der Phasenänderung schafft, wie es sonst üblich ist.

Es finden hier überdies noch die vereinfachten Formeln „für gleiche Intervalle“ [1] Anwendung, sodass die Rechnung ziemlich einfach wird. Hat man nun (2d cos e) gefunden, so ergiebt die Division dieses Wertes durch ein λ_n die ganze rechte Seite der Gleichungen, also

$$n + \frac{1}{2} - P(v) + P(h)$$

Wenn also z. B. $P(v) = 0$ ist (Beschleunigung an Luft in Glas nach Fresnel), so würde ein derartig berechneter Wert von beispielsweise

$$17{,}83 = 17 + 0{,}5 + 0{,}33$$

besagen, dass die Ordnungszahl 17 ist und die Phasenänderung an der unteren Fläche $0{,}33\,\lambda$ Beschleunigung. Man könnte aber die Ordnungszahl des Interferenzstreifens zu 18 annehmen und müsste dann als Phasenänderung eine Verzögerung von $0{,}67\,\lambda$ ansetzen, so dass die Frage: „Phasenverzögerung oder Beschleunigung?“ noch besonders zu lösen ist.

An der Art der Rechnung ändert es nichts, wenn die Phase mit der Wellenlänge derart veränderlich ist, dass als erste Näherungsformel

$$P = P' - \frac{1}{\lambda} P''$$

gesetzt werden darf. Man erhält dann einfach

$$\left[2d\cos e + P''\right]\frac{1}{\lambda_n} = n + \frac{1}{2} - P(v) + P'$$

---

1. Kohlrausch, Leitfaden § 3.

und man findet also den Wert P', dessen Bestimmung auch wohl zunächst wichtig ist, während man statt mit 2dcose mit einem um P'' grösseren Werte rechnet.

Ueber die Grösse von P'' giebt annähernd die weiter unten gegebene Zahlenfolge für Silber hinter Glimmer Auskunft.

Es wäre dort für parallel polarisiertes Licht

$$P = P' - \frac{1}{\lambda} 0{,}044 \quad (\lambda \text{ in Tausendstel mm})$$

Es liegen aber wohl noch zu wenig Resultate vor, um hieran weitere Schlüsse zu knüpfen.

Dass diese Methode auch erlaubt, Spiegel aus massivem Metall zu untersuchen, darf wohl als ein besonderer Vorteil bezeichnet werden. Im Folgenden sind allerdings noch die weniger kostspieligen Niederschläge auf ebenen Glasplatten angewandt worden, weil erstere nicht erreichbar waren. Experimentell erfordert diese Methode eine ähnliche Anordnung wie die Wernickes und bedingt wie diese nur kleine Spiegelflächen.

II. Der Beobachtungsapparat.

a) Die Spiegel.

Die Schwierigkeit der Herstellung reiner Spiegelflächen ist aus einer grossen Zahl neuerer Arbeiten bekannt.[1] Da die Einwirkung einer andersgearteten Oberflächenschicht nicht zu bezweifeln ist, muss man also zunächst jede Möglichkeit für die Entstehung derselben auszuschliessen suchen. In dieser Hinsicht habe ich es bei Spiegeln hinter einem durchsichtigen Blättchen stets vermieden, das letztere vor der Versilberung mit irgend welchen anderen Substanzen in Berührung zu bringen, und ich benutzte deshalb Glimmer-

1. Vgl. z. B. Schmidt Ann. Wied. 52 S. 157.

blättchen, die unter Wasser abgespalten,[1] aus diesem Wasser direkt in die Versilberungsflüssigkeit gebracht wurden.

Immerhin kann man bei der chemischen Versilberung keine Gewähr dafür übernehmen, ob von den fremden Stoffen, die in der Versilberungs-Flüssigkeit anwesend sind, nicht auch Teile in den Spiegelbelag mit hineingezogen werden, und ich habe deshalb gerne die Gelegenheit benutzt, durch Zerstäubung der Kathode in Vacuum hergestellte Spiegel zu untersuchen. Herr Boas hat[2] dieses Verfahren derart vervollkommnet, dass man bei Beobachtung genügender Vorsichtsmassregeln den Erfolg stets gewährleisten kann. Inbezug auf die nähere Ausführung darf ich hier auf die betreffenden zwei Patentschriften und auf eine in Aussicht stehende eingehendere Veröffentlichung des genannten Herrn verweisen, hier sei nur Folgendes erwähnt.

Flache, gegen 20 cm breite und 10 cm hohe Vacuumgefässe enthielten eine breite Scheibe des zu verwendenden Metalls als Kathode, darunter — etwa 2 cm entfernt und wie die Kathode horizontal gelagert — die zu bestäubende sorgfältigst gereinigte Glasplatte. Man konnte, wie hier gleich bemerkt sein mag, übrigens die geringste an dem Glase haften gebliebene Unreinigkeit, sofort an dem wechselnden Glanz des Spiegels erkennen, nachdem die Zerstäubung vollendet war; und es wurden natürlich derartige Präparate auch, trotzdem sich die störende Substanz nur an der Rückseite befand, nicht zur Beobachtung benutzt. Der Umstand, dass die Kathode eine grosse, den Spiegel noch an Grösse übertreffende Fläche hatte, bedingte einen durchaus gleichmässigen Belag, sodass die einzige grössere Schwierigkeit eigentlich nur in der Herstellung eines sauer-

1. Es empfiehlt sich, dazu ein papierdünnes Elfenbeinmesser zu benutzen.

2. D. R. P. No. 82247 und No. 85435.

stoff-freien Vacuums lag. Letzteres wurde durch eine automatische Rapssche Pumpe erzeugt, und es kam nur darauf an, durch häufiges Ausspülen des ganzen Apparates mit reinem Wasserstoff die schädlichen Gase zu entfernen. Dieses Ausspülen wurde dann auch während der ganzen Dauer des Prozesses ständig fortgesetzt, indem die Pumpe weiter arbeitete, und von Zeit zu Zeit geringe Mengen elektrolytisch erzeugten und gereinigten Wasserstoffs eingelassen wurden. Als Kriterium diente stets die Beobachtung des Spektrums, welches durch die Entladungen des benutzten Induktoriums erzeugt wurde. Ich bin Herrn Boas zu Dank verpflichtet, sowohl für die Ueberlassung seiner Apparate, wie für die Mitteilung der einzelnen Erfahrungen, die zum Gelingen derartiger Verfahren stets nötig sind.

Es können nach dieser Methode mit Leichtigkeit gute Spiegel aus den Edelmetallen hergestellt werden — auch die Zerstäubung anderer Metalle scheint aussichtsvoll — sodass in dieser Arbeit ausser Beobachtungen an Silberspiegeln auch eine wenngleich beschränkte Zahl von Versuchen mit Gold- und Platinniederschlägen beschrieben werden konnte.

Bei dieser Art des Verfahrens ist es unmöglich, dass fremde Substanzen in den Spiegel gelangen, wenn — und dies war ja stets die Hauptsorge — der Ausschluss von Sauerstoff Freiheit von Oxyd bedingte; darum zeigten dann auch die fertigen Spiegel des Silbers jenes satte Blau, die von Gold das Blaugrün, welche als charakteristische Farben der reinen Metalle bekannt sind, während Platin eine graublaue Färbung im durchscheinenden Licht aufwies. Bei den für die nachfolgenden Versuche angefertigten Metallbelegen war übrigens die Dicke stets soweit getrieben, dass nur gerade noch eine Spur von Licht durchgelassen wurde.

Als wahrscheinlich darf man wohl annehmen, dass ein Teil des Wasserstoffs in den Metallen verdichtet wird; es wurden nun auch nach der Vollendung des Belages die

Spiegel stets eine Zeit in Wasserstoff belassen, sodass die an der Oberfläche adsorbierte Gasschicht ebenfalls Wasserstoff war: man hat so wenigstens nur einfache Verhältnisse und eine definierbare Oberfläche an den zu untersuchenden Spiegeln. Dass bei dem nun folgenden Ueberdecken des Spiegels mit einer reinen Glasplatte und Zusammenpressen beider zur Erzeugung eines Luftblättchens jede Berührung der Spiegelfläche mit den Händen oder anderen Gegenständen vermieden wurde, bedarf kaum der Erwähnung.

b) Die übrigen Apparate.

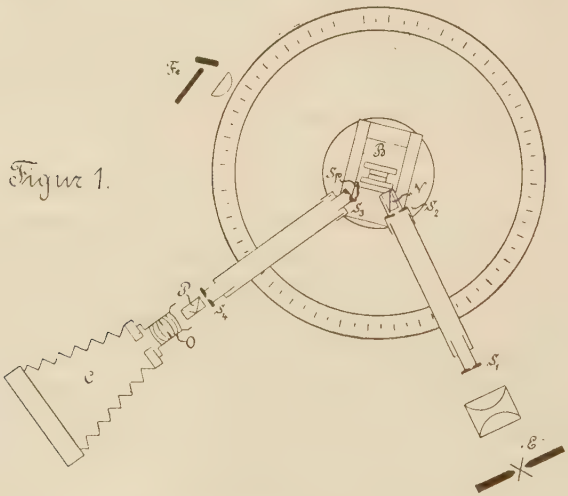
Die Methode, nach welcher die Beobachtung geschah, war, kurz beschrieben, folgende. Ein schmales Lichtband, dessen Richtung durch zwei Spalte definiert war, fiel durch das bewegliche Rohr eines Spektrometers auf das „dünne Blättchen"; in der Richtung des reflektierten Strahles befand sich nahe an dem Spiegel ein Spalt, von dem durch Prisma und photographisches Objektiv ein Spektrum auf die photographische Platte entworfen wurde, sodass hier die Interferenzen des Blättchens aufgezeichnet wurden.

Die Lichtquelle (vergleiche Figur 1) bestand dabei in der positiven Kohle einer Bogenlampe E, deren Bild auf den Spalt S_1 durch eine Projektionslinse entworfen wurde und dort stets in solcher Höhe gehalten werden konnte, dass nur das Licht der glühenden Kohle durch den Spalt S_1 — der übrigens kaum $^1/_2$ cm Länge hatte — weiter ging. Mehrfache Vorversuche hatten gezeigt, dass die Benutzung einer glühenden Fläche und damit eines kontinuierlichen Spektrums absolut notwendig war, indem die Interferenzstreifen bei einem Linienspektrum, selbst wenn es so viele Linien enthielt, wie das des Eisens, keine deutlich erkennbare Grenze von Maximum und Minimum aufwiesen. Die vereinzelten Linien, welche trotz der angewandten Vorsicht noch an den Stellen des Spektrums bemerkbar wurden, wo die Banden der Kohle[1] sich befinden, vermochten sogar häufig

die Lage von Streifen an dieser Stelle so zu überdecken, dass dieselben bei der Berechnung als unsicher ausgeschieden werden mussten: im übrigen war aber die Kontinuität eine recht gute.

Die Einführung des elektrischen Lichtes überhaupt halte ich für einen besonderen Fortschritt gegenüber der bisher üblichen Benutzung von Sonnenlicht bei der Wernickeschen Anordnung; sie ermöglichte es, die bisher in ihrer Abhängigkeit von der Witterung so zeitraubende Methode derart zu vereinfachen, dass ich im Verlauf weniger Stunden eine Untersuchung vollenden konnte, die sonst sich über Tage erstreckt haben würde. Allerdings waren die gleich zu erwähnende photographische Aufnahme und das Entwerfen eines Vergleichsspektrums notwendige Ergänzungen dieser Abänderung.

Figur 1.



Eine Linse[2], die durch einen zweiten Spalt S_2 bis auf 1 mm abgeblendet war, machte das von S_1 kommende Licht

1. Vgl. Kayser und Runge Wied. Ann. 38 Seite 80.
2. In der Figur nicht gezeichnet.

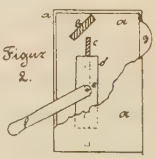
(von ihrem Brennpunkt) streng parallel, und ein Nikol N liess nur die jeweilig gebrauchte Polarisationsrichtung senkrecht oder parallel zur Einfallsebene durchgehen.

Das dünne Blättchen mit dem Spiegel befand sich auf dem Spektrometertischchen, genau senkrecht zur Ebene desselben ausgerichtet, in einer Schlittenführung B, damit man durch Parallelverschiebung der Glasplatten die Versetzung des Lichtstrahles wieder aufheben konnte, welche beim Durchgange durch die vordere etwa 2,7 mm starke Glasplatte entstand. Da nämlich die beiden Kollimatoren des Spektrometers genau auf die Achse desselben gerichtet waren, so würden die zu ihnen gehörigen Strahlen sich nicht in der Achse, sondern etwas dahinter getroffen haben und zwar um so weiter zurück, je stärker die Richtungsänderung des Strahles durch die Brechung war. In unserm Fall ist also der Spiegel mit der vor ihm befindlichen Glasplatte um ein bestimmtes Stück hinter die Achse zu verschieben, das mit wachsendem Einfallswinkel stets grösser wird: sodass dadurch das Bild von S_2 auf den Spalt S_3 geworfen wird, der — etwa 0,02 mm weit — als Ursprung des Spektrums gilt, welches durch das Prisma P und die Linse O in der Camera C entworfen wird. Bevor der Lichtstrahl das Prisma passierte, wurden noch durch einen Spalt S_4 — der etwa 1 mm weit war — die Randstrahlen abgeblendet, sodass die Linse O (wie schon erwähnt, ein photographisches Objektiv) ein sehr scharfes Bild des Spaltes S_3, übrigens in natürlicher Grösse wiedergab.

Die bedeutende Länge des letzten Teiles des Apparates von etwa 1,5 m machte denselben so wenig stabil, dass eine Kalibrierung des Spektrums, wie ich sie ein für alle Mal hätte vornehmen können, wenig sicher zu sein schien; ebenso würden sich wohl auch durch Temperaturänderungen leicht Aenderungen der Dispersion des (geradsichtigen) Flüssigkeitsprismas P ergeben haben, das ich sonst wegen seiner starken Dispersion nicht gerne missen mochte. Dagegen giebt jetzt

der ausgezeichnete Atlas des Eisenspektrums von Kaiser und Runge[1] ein äusserst bequemes Mittel, um in der Form eines Vergleichsspektrums jeden Punkt eines Spektrums mit grösster Genauigkeit festzulegen, da infolge der grosssn Zahl von Linien an jeder Stelle leicht zwei naheliegende Eisenlinien vorhanden sind, zwischen denen die Interpolation als durchaus fehlerfrei gelten darf. Man darf sich dieses Kalibrierungsspektrum aber nicht in dem Bogen der elektrischen Lampe erzeugen, etwa durch Einführung von Eisensalzen, da hierdurch, wie schon oben erwähnt wurde, sofort die Interferenzstreifen unsicher werden, und es erwies sich deshalb nur die folgende Anordnung als brauchbar. Vor dem Spalt S_3, auf den ja das Spektrum bezogen war, befand sich ein schräg gestellter Spiegel Sp, dessen Mitte ungefähr auf 5 mm durchbrochen war und hier den von B kommenden Strahlen freien Durchgang gestattete: oben und unten dagegen reflektierte er das von einer Eisenlampe Fe kommende Licht in den Spalt S_3, sodass auf der photographischen Platte in C ein dreiteiliges Spektrum entstand, dessen oberes und unteres Feld das Linienspektrum des Eisens und dessen Mitte auf dem Hintergrunde des kontinuierlichen Spektrums der positiven Kohle das zu untersuchende Interferenzenbild enthielt.

Die Eisenlampe hat sich in ihrer Einfachheit recht brauchbar erwiesen und verdient darum wohl eine nähere Beschreibung, da diese Art der Kalibrierung des Spektrums sich vielleicht auch für andere optische Messungen empfehlen dürfte. Sie bestand (vergleiche Figur 2) aus einer horizontal, etwas schräg nach hinten gelagerten Eisenplatte b und einem senkrecht stehenden Stab c, der in der Fassung d um die Achse e drehbar befestigt war. Das


Figur 2.

1. Kayser und Runge, Berlin 1888 Sitzber. der Ak. XXXVII S. 915.

Ganze wird von dem Gehäuse a gehalten. Die Stromzuführungen sind nicht in der Figur gezeichnet. Eine Linse g, auf die Stelle eingestellt, wo Stab und Platte sich bei der Drehung des letzteren berühren mussten, entwirft dann von dem elektrischen Lichtbogen, den man von der gleichen Quelle wie die Lampe E speisen kann, ein Bild auf den Spiegel Sp (Figur 1). Bildet sich auf den Elektroden eine nicht leitende Oxydschicht, die besonders nach dem Verlöschen des Bogens häufig das Zustandekommen desselben wieder verhindert, so kann man dieselbe leicht absprengen, indem man die Stange durch Drehung von d mittels des Handgriffs f kräftig gegen die Platte anschlagen lässt; ebenso kann man durch geringes Drehen des Stabes die Länge des Bogens richtig einstellen, und damit eine bläuliche Färbung der Flamme, welche die besten Linien ergiebt, erzielen. Diese Lampe vermeidet mehrere Schwierigkeiten, welche die Herren Kaiser und Runge bei den vorher erwähnten Aufnahmen mit einer anderen Konstruktion als störend empfanden, nämlich das Aneinanderhaften der Elektroden und die Störung durch Schlacke; auf das Festhalten des Bogens durch ein magnetisches Gebläse habe ich dagegen weniger Gewicht gelegt, vielmehr nur darauf geachtet, dass bei dem Wandern des Bogens der Lichtschein in die Kollimatorrichtung S_3 S_4 fiel, und nötigenfalls wurde durch Verschieben der Lampe nachgeholfen. Der über das Spaltrohr oben hinausragende Spiegel Sp ermöglichte dabei eine leichte Kontrolle der Richtung des Scheines.

An photographischen Platten habe ich verschiedene Sorten mit gleichem Erfolge angewandt, empfehlenswert ist es nur empfindliche, aber trotzdem glasklar arbeitende Platten zu nehmen. Diese Platten wurden zunächst mit H. W. Vogels „Photoazalin“ [1] rot-empfindlich gemacht und dann in passende Streifen 13×2 cm zerschnitten: entwickelt wurden

1. Aktiengesellschaft für Anilinfarbenfabrikation, Berlin.

sie nach der Exposition meist mit Glycin, das sehr klar und zart arbeitete, so dass ich im Violetten z. B. Linien geringster Intensität deutlich erkennbar aufnehmen konnte, trotzdem das ganze Spektrum von 0,650μ bis 0,360 etwa nur 10 cm lang war. Benutzt wurden übrigens für die nachfolgenden Rechnungen nur Beobachtungen von 0,600μ bis 0,390μ, weil an der Grenze im Rot die Intensität plötzlich stark abnimmt und im Violett bei 0,388 eine Kohlebande einsetzt, die jede genaue Bestimmung der Lage eines Interferenzstreifens unmöglich macht.

Der Gang einer Untersuchung war nun etwa folgender. Das Spektrometer war nach dem bekannten Verfahren zunächst in sich justiert, und die Nullstellung der Kollimatorröhren festgestellt; ebenso war die Camera, Prisma und Spalt S_3 so eingestellt, dass das Spektrum auf eine möglichst weite Strecke scharfe — und natürlich auch senkrechte — Linien zeigte. Dann wurden die aufeinandergelegten Glasplatten, deren eine den Spiegel trug, mittels zweier Paare Holzleisten, die durch je zwei Schrauben zusammengeschraubt werden konnten, oben und unten zusammengepresst und die vier Schrauben so angezogen, dass in der Mitte der Platten eine gleichmässige Newtonsche Farbe auftrat, die überdies etwa 20 Interferenzen im Spektrum erzeugen musste, eine Zahl, die nach meiner Erfahrung am passendsten war. Der Spiegel wurde nun auf dem Tischchen des Spektrometers ausgerichtet und seine Nullstellung bestimmt, sodass bei der nun folgenden Einstellung der verschiedenen Einfallswinkel stets sowohl am Tischchen der Einfallswinkel selbst wie am Kollimator $S_1 S_2$ das Doppelte davon eingestellt wurde, und also auf diese Art eine ständige Kontrolle ausgeübt werden konnte. Die elektrische Bogenlampe E war zur leichteren Beweglichkeit mit ihrer Linse auf einem besonderen Tischchen mit Rollen aufgestellt, sodass auch sie leicht den Bewegungen des Kollimators folgen konnte. Nun war alles zum Exponieren

der Platte bereit, und zwar begann dasselbe mit dem Anlassen der Bogenlampe, der nach einer Minute die parallel geschaltete Eisenlampe folgte: nach zwei weiteren Minuten wurde letztere abgestellt, und nach vier Minuten war die ganze Belichtung vollendet.

Die vollständige Versuchsreihe für jeden Spiegel bestand meist in je zwei Aufnahmen (Nikol parallel und senkrecht zur Einfallsebene) für jeden der 7 Einfallswinkel 15^0 30^0 40^0 50^0 60^0 70^0 80^0, und dauerte höchstens 2 Stunden; das Entwickeln erfolgte erst nach dieser Zeit, da nur wenige Aufnahmen misslangen, und so keine ständige Kontrolle nötig war.

c. Die Ausmessung der Platten

erfolgte sehr einfach durch Ueberdecken eines in Glas geätzten, in Zehntelmillimeter geteilten Massstabes, dessen Mittellinie auf den bezüglichen Interferenzstreifen des Mittelfeldes eingestellt wurde, sodass man oben und unten die Entfernung zweier Spektrallinien von der Mitte des Interferenzstreifens bis auf Zehntel und Hundertstel Millimeter, wobei letztere geschätzt wurden, ablesen konnte. Zur Erleichterung des Verfahrens lag dabei die Platte auf einem Glasschlitten (der von unten durch einen Spiegel erleuchtet werden konnte) auf dessen beweglichem Mittelstück, während das Mikrometer auf den festen Teilen auflag. Der geringe Zwischenraum zwischen Glasmikrometer und beweglicher Platte bedingte natürlich eine Parallaxe; diese war aber leicht unschädlich zu machen, wenn man zwischen Einstellung auf den Interferenzstreifen und Abschätzen der Entfernung der Spektrallinien das Auge ruhig hielt. Eine Lupe, welche das Ablesen erleichterte, unterstützte übrigens auch zugleich dieses Festhalten der Sehrichtung.

Der Atlas von Kaiser und Runge[1] lag dabei stets vor den Augen, sodass jede Linie auf der Platte sofort in den

1. Sitzber. der Ak. XXXVII S. 915 Berlin 1888 (Sonderabdruck)

Tafeln aufgesucht werden konnte. Es verursachte zuerst etwas Mühe, die Linien eines so zusammengedrängten Spektrums von höchstens 10 cm, wie es das meine war, mit denen des etwa $2^1/_2$ m langen Atlasses zu identifizieren: nachdem ich aber nach etwa zwei Wochen einmal alle Linien einer Aufnahme in dem Atlas wieder aufgefunden hatte, war dieses Wiedererkennen so leicht geworden, dass selbst durch Polarisation umgekehrte und daher „doppelt" erscheinende Linien keine Irrtümer mehr veranlassen konnten.

Die Genauigkeit der Ablesungen an den Linien und damit der Auswertung des Spektrums übertrifft die der Einstellung auf die Mitte des Interferenzstreifens so erheblich, dass man sagen darf: erstere verursache überhaupt keine Fehler. Recht unangenehm ist dagegen die scheinbare Verschiebung der Minima infolge der wechselnden Intensität des Spektrums. Man muss bei den Spektralinterferenzen mit dieser Fehlerquelle ungefähr ebenso rechnen, wie bei den Interferenzen keilförmiger Blättchen mit dem ungleichmässigen Abfall des Keiles, nur sind bei der ersteren Methode die Ursachen der Ungleichförmigkeit des Spektrums, nämlich: Eigenart der Lichtquelle, Absorption im Apparat und verschiedene Farbenempfindlichkeit der Platte, stets dieselben und damit sind die Fehler derselben ebenfalls die gleichen bei allen Beobachtungen. Da man ausserdem die Stellen, wo plötzlich die Intensität abnimmt, stets auf den Negativen erkennen kann, braucht man nur Interferenzstreifen an diesen Orten von der Berechnung auszuschliessen, um obige Fehler zu vermeiden. Eine schwächere oder stärkere Intensität des Eindruckes auf der Platte macht dagegen, wenn nur eben nicht gerade der Uebergang zwischen beiden in Frage kommt, keine besonderen Schwierigkeiten, da man durch stärkere oder schwächere Beleuchtung allen Intensitätsverhältnissen des photographischen Bildes so gerecht werden kann, dass sich der Interferenzstreifen von seinem Hintergrunde abhebt. Es darf hierbei vielleicht noch besonders

darauf aufmerksam gemacht werden, dass Interferenzen der Metallspiegel ein ganz anderes Bild geben als diejenigen durchsichtiger Blättchen. Hat man bei diesen scharf sich abhebende Maxima und Minima, deren Uebergänge auf der photographischen Platte kaum $^1/_5$ der Streifenbreite ausmachen, so ist bei der Anwendung von Metallbelegen der Uebergang vom Hellen zum Dunkeln mehr kontinuierlich, sodass es einige Sorgfalt erfordert, um durch das Entwickeln die Kontraste zu verstärken, ohne wiederum durch zu „hartes" Entwickeln die schwächeren Spektrallinien zu vernichten. Eine weitere Ursache für diese Schwierigkeit liegt darin, dass das Spektrum ungleiche Helligkeit hat, sodass in den hellen Partien die Maxima, in den dunkleren die Minima verbreitert erscheinen. Ein derartiges Bild lässt sich zwar durch Aenderungen der Beleuchtung noch an allen Stellen gut beobachten, aber nicht mehr gut reproduzieren, weshalb auch an dieser Stelle darauf verzichtet worden ist.

III. Zur Frage: Phasenverzögerung oder Beschleunigung?

Es erscheint eigentlich unnötig über den Sinn der Phasenänderung noch weiter zu sprechen, nachdem Herr Wernicke in seiner Arbeit über „normale und anomale Phasenänderung"[1] den Beweis geliefert hat, dass bei dem Uebergange von dünnen Silberschichten zu dicken, vorausgesetzt dass man einwandsfreie Präparate benutzt, ein Uebergang der Phasenänderung von Null zu einer Beschleunigung sich ergiebt (verglichen mit der im dichteren am dünneren Medium, welche mit Fresnel = 0 gesetzt ist). Ich darf hier gleich bemerken, dass auch meine Versuche dies Resultat bestätigen, dagegen möchte ich gegen die andere Schlussfolge der Wernickeschen Arbeit einiges einwenden. Wenn Herr Wernicke z. B. bemerkte, dass der Uebergang von der Reflexion an Glas zu der an Silber in dem Sinne stattfand,

1. Ann. Wied. 51 Seite 448—459 und 52 S. 515.

dass er eine wachsende Verzögerung darzustellen schien, so schloss er daraus, dass der Spiegel thatsächlich eine Verzögerung der Phase zeige. Meine Beobachtungen werden dagegen darthun, dass nichtsdestoweniger die Phasenbeschleunigung bestand, dass dagegen die scheinbare („anomale") Aenderung nach der anderen Richtung nur eine sekundäre Interferenzerscheinung war.

Um einmal die Anschauung festzulegen, nehmen wir an, wir hätten ein dünnes durchsichtiges Blättchen Glimmer — wie es von mir bei diesen Versuchen thatsächlich benutzt wurde — und hinter diesem oben Luft, dann einen von 0 allmählich bis zur Undurchsichtigkeit zunehmenden Keil von Silber, so wird sich im Spektrum stets folgende Interferenzerscheinung zeigen: die Interferenzen am „massiven" Silber sind gegen die an Luft erzeugten um etwa 0,37 λ nach Violett verschoben (nach Rot gerechnet um 0,63 λ), und hängen mit den Luftstreifen bald im Sinne einer Verschiebung nach Violett bald im Sinne einer nach Rot zusammen, je nachdem störende Einflüsse bei der Anfertigung des Spiegels ausgeschlossen waren oder nicht. Man müsste nun mit Herrn Wernicke sagen, dass im Falle des Violettüberganges eine Beschleunigung von 0,37, im Falle des Rotüberganges eine Verzögerung von 0,63 am „massiven" Spiegel vorhanden sei; dann sollte man aber auch erwarten, dass „massive" Silberspiegel von einem gewissen Grade der Verunreinigung auch einmal die Aenderung 0 ergeben würden. Dies ist aber noch nicht beobachtet worden, und so ergab sich hieraus, dass wie die relative Verschiebung so auch wahrscheinlich ihr Sinn stets derselbe sei, und infolgedessen die eine Art des Zusammenhanges dem wirklichen Phasenübergang entspräche, während die andere eine Störung der wirklichen Erscheinung darstelle. Als Ursache dieser Störung die Eigenart des halb durchsichtigen Keilüberganges anzunehmen, lag dann nahe. Das Experiment bestätigte diese Vermutung.

Etwa 15 Spiegel von Silber hinter Glimmer mit einem

keilförmigen Uebergang für Dicke 0 zeigten im photographischen Bilde stets den Zusammenhang nach beiden Seiten, mochten die Silberbelegungen chemisch oder durch Zerstäubung erhalten sein. Bei der chemischen Versilberung erhält man den Keil leicht, wenn man das Blättchen halb aus der Flüssigkeit herausragen lässt, wo dann das kapillare Hochsteigen der Flüssigkeit den Uebergang erzeugt. Bei den Kathodenspiegeln war der Keil dadurch hergestellt worden, dass zunächst ein Glasstück von etwa 5 mm Dicke auf das Glimmerblättchen, dasselbe halb bedeckend, gelegt wurde und darüber ein zweites Glasstück um etwa 8 mm, das erste nach der freien Glimmerfläche überragend, wodurch dann ein langsam abfallender Keil von etwa 3—5 mm Länge bei der Zerstäubung entstand. Beide Spiegelarten zeigten bei der Untersuchung nur den Unterschied, dass die Keile der chemischen Spiegel nur etwa 1 mm lang waren und darum die gleich näher zu beschreibenden Erscheinungen nur sehr undeutlich wiedergaben.

Ueberraschend war (vgl. Fig. 3[1]) nun zunächst, dass auf allen photographischen Platten die Streifen Glimmer-Luft

Figur 3.

und Glimmer-massives-Silber nach beiden Seiten zusammenhingen, dass aber der Zusammenhang nach Rot im Roten und der nach Violett im Violetten bedeutend hervortrat und der andere daneben fast verschwand, während die Mitte des Spektrums die Uebergänge entsprechend zeigte. Es liegt

1. Es ist hier eine schematische Zeichnung gegeben, welche durch die Breite der Linien die Intensität der betr. Streifen andeutet. Bei einer Reproduktion des Originals wäre die Erscheinung nicht so gut erkennbar geworden, wie sie das Auge am Original selber verfolgen kann.

nun nahe, diese Erscheinung so zu deuten, dass die violetten und blauen Strahlen, die uns ja auch in der Farbe der Luft das Vorhandensein kleiner materieller Teilchen anzeigen, hier den Charakter der Reflexion feinverteilter Silbermolekeln wiedergeben: also die wirkliche Phasenbeschleunigung. Die roten Strahlen dagegen sind eher geeignet durch die trübdurchsichtige Keilschicht hindurchzudringen und damit die Interferenzen eines keilförmigen Blättchens zu erzeugen. Bestärkt wurde diese Ansicht durch die Form der Kurve des Violettüberganges, die genau der Kurve entspricht, welche Herr Drude[1] für die Phasenänderung wachsender Silberdicken theoretisch gefunden hat, und den Beweis für diesen Schluss ergab die Verwandlung des Silbers in Jodsilber, wobei nur noch die S-förmigen Bogen[2] des Rot-Ueberganges erhalten blieben. Es scheint mir also aus diesen Untersuchungen hervorzugehen, dass die Eigenschaften des undurchsichtigen Silberbelages nicht durch den Uebergang in der keilförmigen Schicht beeinflusst wurden, und dass aus letzterem kein Schluss auf die Reinheit oder Unreinheit des Spiegels zu ziehen ist. Dass im übrigen dieses interessante Verhalten der Keil-Schicht: nämlich einerseits als metallisches, andererseits als durchsichtiges Medium für spätere Untersuchungen über molekulare Eigenschaften und dgl. von Wichtigkeit sein dürfte, braucht wohl kaum angedeutet zu werden.

IV. Resultate an Silberspiegeln hinter Glimmer.

Die vorstehend benutzten Spiegel wurden zum Teil auch einer genaueren Messung unterworfen, indem von 10 zu 10° des äusseren Einfallswinkels die Interferenzstreifen photographiert wurden. Da hier eine Luftreflexion zum Vergleiche sich leicht benutzen liess, wurden aber einfach die

1. Ann. Wied. 51 S. 77.
2. Vgl. auch Wiener Ann. Wied. 31 S. 629 über diese Bogen.

relativen Verschiebungen der Luftstreifen gegen die Silberstreifen gemessen.[1] Die Genauigkeit der Messung war dabei eine so grosse, dass sich auch die Aenderung der Beschleunigung mit der Wellenlänge beobachten liess: es seien deshalb im Folgenden zunächst zwei Messungsreihen an einem chemischen Silberspiegel hinter Glimmer mitgeteilt, und zwar bei 80° äusseren Einfalls (entsprechend etwa 38,5° im Glimmer).

Wellenlänge in Luft	Beschleunig. des parallel zur Einfallsebene polarisierten Lichtes	Wellenlänge in Luft	Beschleunig. des senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Lichtes
0.494	0.431 (?)	0.498	?
0.484	0.415	0.487	0.846 (?)
0.473	0.412	0.477	0.866
0.464	0.410	0.467	0.865
0.455	0.406	0.458	0.835
0.446	0.403	0.449	0.823
0.437	0.395	0.440	0.822
0.429	0.394	0.431	0.826
0.422	0.395	0.423	0.822
0.414	0.392	0.416	0.813
0.407	0.398	0.409	0.809
0.400	0.387	0.402	0.792
0.393	0.389	0.395	0.773
0.387	0.390	0.389	0.738
0.381	0.387	0.382	0.739
0.375	0.384	0.375	0.753

Für die Werte rechts ist dabei zu beachten, dass der Polarisatitionswinkel schon überschritten ist, und dass also 0,5 λ für die Beschleunigung der senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Kompenente am Glimmer von den Zahlen abzuziehen ist, wenn man die eigentliche Beschleunigung am Silber erhalten will. Die Masse der Wellenlänge sind hier

1. ... also die ältere Methode Wernickes benutzt (Vgl. Seite 8).

wie auch im Folgenden stets in Tausendstel Millimetern gegeben, die Beschleunigung stets als Bruchteil der Wellenlänge.

Die Abnahme der Beschleunigung mit der Wellenlänge übertrifft hier erheblich die von Glan beobachtete (vergl. S. 7), und besonders tritt die starke Aenderung bei der Phase des senkrecht polarisierten Lichtes hervor. In den später zu beschreibenden Untersuchungen an Silber in Luft fällt ja infolge der gewählten Methode die Abnahme der Phasenänderung mit den Wellenlängen aus den Resultaten heraus, sodass in dieser Arbeit keine Werte für Luft-Silber gegeben werden konnten; übrigens beziehen sich die Werte des Herrn Glan auch auf ein anderes Metall, nämlich Stahl.

Da bei der Beobachtung an diesen Silberspiegeln hinter Glimmer die Aenderung mit der Wellenlänge nicht aus den Resultaten eliminiert werden konnte, habe ich wenigstens stets denselben Bereich für alle Einfallswinkel zur Messung benutzt und gebe im Folgenden die Mittelwerte von $\lambda = 0.390\mu$ bis $\lambda = 0.400\mu$.

Chemischer Spiegel hinter Glimmer.

Einfallswinkel im Glimmer (n = 1.577)	Beschleunigung Polarisation parallel zur Einfallsebene	Polarisation senkrecht
0^0	0.377	
$6^0\ 19'$	0.374	
$12^0\ 31'$	?	0.365
$18^0\ 29'$	0.381	0.359
$24^0\ 3'$	0.390	
$29^0\ 3'$	0.396	
$33^0\ 18'$	0.402	
$86^0\ 34'$	0.398	0.311
$38^0\ 38'$	0.398	0.313

Für die senkrechte Komponente waren die Aufnahmen so schwierig, dass nur wenige Platten gut messbare Photo-

graphien ergaben, da die ungenügende Polarisation des Nikol und die schwache Intensität dieser Polarisationsrichtung nur sehr mangelhafte Interferenzbilder zustande kommen liessen. Die Resultate sind in der Kurven-Tabelle Seite 37 dargestellt; sie besitzen jedoch nur relativen Wert für den Gang der Erscheinung, da die absolute Lage z. B. des Wertes bei 0^0 bei anderen Spiegeln eine ganz andere wird. Während sich nämlich hier rund 0.37 ergeben würde, beobachtete ich an anderen Spiegeln 0.36 bis 0.40, sodass hier augenscheinlich die Art des Spiegels sehr in Frage zu kommen scheint, denn die niedrigen Werte erhielt ich an chemischen Spiegeln, während die höheren an Kathodenspiegeln erhalten wurden, welche meiner Ansicht nach für bedeutend reiner gehalten zu werden verdienen.

V. Beobachtungen an Silber in Luft.

Im Folgenden wurde nun stets die Berechnung nach Seite 10 und 11 gemacht, das heisst etwa wie folgt verfahren. Die Einstellungen hatten für jeden Interferenzstreifen den relativen Abstand von zwei benachbarten Spektrallinien ergeben, und so wurde daraus zunächst — wie dies ja in den bisher erwähnten Zahlen auch geschehen ist — die Wellenlänge des Streifens berechnet. Ich gebe in der nachstehenden Tabelle einen Teil der Beobachtungen von 36 Streifen einer verhältnismässig starken Luftschicht, wo die Streifen sehr eng aneinander lagen und deshalb die Ermittelungen etwas schwierig waren. In diesem Falle sollte die Phasenänderuug in Luft an Glas $= 0{,}5\,\lambda$ als die Aenderung an der Hinterfläche sich ergeben, sodass ein abweichender Wert zugleich ein Prüfstein für die Genauigkeit der Messung war. Aus den Werten für die λ wurden zunächst die Reziproken derselben berechnet, und dann aus diesen

$$\frac{1}{2d\cos\varepsilon} = 0.025\,570\,6 \text{ gefunden.}$$

Die Multiplikation des Reziproken dieser Zahl mit den $\frac{1}{\lambda}$ ergab dann folgende Zahlenreihe

λ	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{2d\cos e}{\lambda}$
0.38718	2.5828	100.006
0.39096	2.5578	99.029
0.39489	2.5323	98.034
— —	— —	— —
— —	— —	— —
0.60144	1.66268	64.023

Die Werte der letzten Reihe sollten $n + \frac{1}{2} + 0.500 =$ einer ganzen Zahl sein, es ergab sich aber ein Dezimalbruch von 0.031 im Mittel. Für eine Ordnungszahl nahe an 100 war ein so genaues Resultat kaum zu erwarten gewesen; wesentlich genauer als die Phase ist aber der ganze Ausdruck: Ordnungszahl + Phase ausgefallen. Da die Genauigkeit des letzteren proportional der von (2d cos e) ist, so folgt aus obigen Werten, dass die doppelte Dicke (2d) auf etwa 0,04 % genau bestimmt war. Diese Genauigkeit ist durchaus nicht zufällig, wie mir verschiedene derartige Versuche bestätigten, und dürfte für Dickenbestimmungen solcher Blättchen vielleicht weiteres Interesse beanspruchen. Für unsere Versuche genügte sie noch nicht, denn hier kam nicht die relative Genauigkeit in Betracht, sondern es wurde als absolute etwa 0,01 % einer Wellenlänge gewünscht, und es zeigte sich in den Versuchen, dass diese am besten bei Ordnungszahlen von etwa 30—20 erreicht wurde.

Es mögen nun im Folgenden die Werte für die einzelnen Silberspiegel angeführt werden.

Silberspiegel I.

zeigte nicht den hohen Glanz wie die später untersuchten,

da aber sonst nichts Nachteiliges an ihm zu bemerken war, wurde er untersucht. Ein schlechtes Arbeiten der elektrischen Bogenlampe verdarb einen grossen Teil der Bilder, indem die positive Kohle nicht ständig die Lichtquelle war, sondern auch der Bogen selber seine Strahlen in den Apparat sandte, sodass verbreiterte fleckenartige Streifen und Hervortreten von Linien im kontinuierlichen Spektrum die Folge waren.

Die folgenden Platten ergaben einigermassen gut definierte Streifen:

Parallel polarisiertes Licht.	1. 30°	Ordnungszahlen	16—21	Phase[1]	0,49
	2. 40°	„	14—18	„	0,54
	3. 50°	„	11—18	„	0,48
	4. 60°	„	9—13	„	0,49

Dicke der Luftschicht 5,2 μ.

Ich glaube diese hohen[2] Werte der Beschleunigung zuerst auf eine schlechte Beschaffenheit des Spiegels zurückführen zu müssen, die zwar äusserlich durch kein anderes Zeichen erkennbar gewesen wäre als durch den etwas geringeren Glanz, der ungefähr so war, wie man ihn bei chemischen Spiegeln gewöhnt ist, die weiter folgenden Beobachtungen an vollkommen einwandsfreihen Spiegeln gingen aber noch weiter als die ersten.

Silberspiegel II.

Der Spiegel war hoch glänzend und auf seiner etwa 3×3 cm grossen Fläche durchaus gleichmässig niedergeschlagen. Dicke der Interferenzschicht 5,6 μ.

---

1. Die Phasenänderung ist also das P′ von Seite 11. Uebrigens ist hier wie in allen folgenden Tabellen die Aenderung in Glas an Luft = 0 gesetzt.

2. Aus Drudes Wert 0,412 würde sich mit dem Wert für P″ auf Seite 12 etwa P = 0,485 ergeben.

Werte der Beschleunigung parallel zur Einfallsebene:

1.	30°	Ordnungszahlen	17—24	Phase 0,57
2.	40°	„	15—20	„ 0,54
3.	50°	„	13—18	„ 0,56
4.	60°	„	10—14	„ 0,52
5.	70°	„	7—8	„ 0,57

Der Gang dieser Zahlen zeigt, dass jedenfalls die Beschleunigung über 0,5 beträgt. Auch für die Polarisationsrichtung senkrecht zur Ebene gelangen zwei Platten:

6.	15°	Ordnungszahl	19—26	Phase 0.60
7.	30°	„	18—23	„ 0.54

Es folgt nun der letzte Silberspiegel, bei dem die photographischen Aufnahmen verhältnismässig am besten gelungen waren, da durch „hartes" Entwickeln ein grösserer Kontrast zwischen den Maxima und Minima erzielt worden war, allerdings auf Kosten der zarteren Spektrallinien, die infolge dessen verschwanden.

Silberspiegel III. Dicke der Luftschicht 4,9μ.

Beschleunigung parallel zur Einfallsebene.

1.	15°	Ordnungszahlen	16—22	Phase 0,58
2.	30°	„	15—18	„ 0,58
3.	40°	„	14—17	„ 0,59
4.	50°	„	11—15	„ 0,56
5.	60°	„	9—12	„ 0,60
6.	70°	„	6—7	„ 0,61
7.	80°	„	3	„ 0,62

Die Werte unter 6 und 7 sind schon einigermassen unsicher, da die Dicken extrapoliert werden mussten und bei so schrägem Einfall leicht die Möglichkeit vorliegt, dass die Strahlen nicht genau dieselbe Stelle und damit: Dicke der Schicht treffen, wie bei kleineren Einfallswinkeln. Auch

die Werte bei der Polarisationsrichtung senkrecht zur Einfallsebene seien mitgeteilt, soweit die Aufnahmen gelangen:

8.	15°	Ordnungszahl	17—23	Phase	0,50
9.	30°	„	15—20	„	0,49
10.	40°	„	12—16	„	0,42

Wie schon aus den Zahlenangaben hervorgeht, habe ich nur bis zu Einfallswinkeln von 15° herab Versuche gemacht, denn die Beobachtung bei 0°,[1] wie sie bei Spiegeln hinter Glimmer geübt wurde, bringt zuviele Komplikationen mit sich: da man jedesmal vor dem Spalt S_3 eine schräggestellte Spiegelglasplatte anbringen muss, deren Justierung u. s. w. sehr viel Mühe erfordert. Die geringe Aenderung, welche aber offenbar die Beschleunigung in den untersten Winkelgraden erleidet, macht zunächst diese Mühe überflüssig, die man bei dem ohnehin viele Aufmerksamkeit erfordernden Beobachtungsapparat gerne vermeidet.

Die Kurventafel S. 37 giebt die an Silber erhaltenen Werte zusammengestellt, und es geht aus ihr zweifellos hervor, dass die Beschleunigung bei 0° etwa 0,55, sicher aber über 0.5 betragen würde. Die Kathodenspiegel scheinen also doch einen anderen Charakter zu haben, wie man ihn bisher an Silberspiegeln, die chemisch niedergeschlagen waren, beobachtet hat.

VI. Goldspiegel in Luft.

Von grösstem Interesse war es für mich, dass die Verbesserungen der Boasschen Methode auch das Niederschlagen anderer Metalle gestatteten und so auch Goldspiegel untersucht werden konnten. Allerdings ergaben die beiden Spiegel, welche mir zur Verfügung standen, auch voneinander abweichende Resultate, ohne dass von vornherein ein Unterschied zwischen beiden bemerkbar gewesen wäre; und so scheint auch hier die Thatsache sich

1. Vgl. Wernicke Ann. Pog. 159 Seite 198.

zu ergeben, dass die Metallspiegel in diesem Bereiche eben Abweichungen zeigen, deren Ursache noch nicht festzustellen ist.

Goldspiegel I. Dicke der Luftschicht 5,6 μ.

Beschleunigung parallel zur Einfallsebene.

1.	15°	Ordnungszahl	der	Streifen	19—27	Phase	0,32
2.	30°	„	„	„	17—23	„	0,28
3.	40°	„	„	„	16—21	„	0,33
4.	50°	„	„	„	12—17	„	0,38
5.	60°	„	„	„	9—12	„	0,44

Die andere Polarisationsrichtung ergab:

Beschleunigung senkrecht zur Einfallsebene.

6.	15°	Ordnungszahl	der	Streifen	19—27	Phase	0,29
7.	30°	„	„	„	18—23	„	0,30
8.	40°	„	„	„	15—21	„	0,27

Goldspiegel II. Dicke der Luftschicht 7,3 μ.

Beschleunigung parallel zur Einfallsebene.

1.	40°	Ordnungszahl	der	Streifen	20—27	Phase	0,26
2.	50°	„	„	„	16—23	„	0,30
3.	60°	„	„	„	13—18	„	0,36
4.	70°	„	„	„	9—11	„	0,33
5.	80°	„	„	„	4—5	„	0,43

Beschleunigung senkrecht zur Einfallsebene.

6.	15°	Ordnungszahl	der	Streifen	25—36	Phase	0,21
7.	30°	„	„	„	22—31	„	0,23
8.	50°	„	„	„	17—23	„	0,20
9.	70°	„	„	„	12	„	—0,04 (?)
10.	80°	„	„	„	6	„	—0,06 (?)

Die beiden letzten Werte sind, weil der Polarisationswinkel des Glases überschritten war, mit einer Phasenänderung am Glase von 0,5 berechnet, aber naturgemäss etwas unsicher, weil die Werte $2d\cos\varepsilon$ für dieselben aus

den Beobachtungen 4 und 5 übernommen werden mussten. Die Resultate der Goldspiegel stellen die Kurven 3 dar. Uebrigens waren die Interferenzstreifen in diesem Falle wegen der geringeren Reflexion des Goldes recht gut zu beobachten.

VII. Platinspiegel in Luft.

Auch einen Platinspiegel konnte ich untersuchen, und auch hier machte sich die geringere Reflexionsfähigkeit zum Vorteil der Interferenzstreifen bemerkbar. Dass ich diese Beobachtungen nicht an einem zweiten Spiegel bestätigen konnte, habe ich lebhaft bedauert, aber es lag nun einmal in der ganzen Art der Herstellung, dass mir überhaupt nur eine beschränkte Zahl von Spiegeln zur Verfügung standen: immerhin hat wohl auch diese einzige Beobachtung einiges Interesse.

Platinspiegel I. Dicke der Luftschicht 6,9 μ.

Beschleunigung parallel zur Einfallsebene.

1.	15°	Ordnungszahl	der	Streifen	23—34	Phase	0,38
2.	30°	„	„	„	20—29	„	0,40
3.	40°	„	„	„	20—26	„	0,39
4.	50°	„	„	„	15—21	„	0,38
5.	60°	„	„	„	12—26	„	0,38
6.	70°	„	„	„	8—9	„	0,41
7.	80°	„	„	„	3—4	„	0,44

Beschleunigung senkrecht zur Einfallsebene.

8.	15°	Ordnungszahl	der	Streifen	23—34	Phase	0,37
9.	30°	„	„	„	21—29	„	0,39
10.	40°	„	„	„	18—26	„	0,29
11.	50°	„	„	„	16—21	„	0,28
12.	70°	„	„	„	10—11	„	0,07
13.	80°	„	„	„	5	„	0,03

Auch hier dürfen die Beobachtungen 6, 7, 12, 13 nicht eine hohe Genauigkeit für sich beanspruchen. Kurve 4 giebt die Beobachtungen an dem Platinspiegel wieder. (S. 37.)

VII. Die Resultate und einige Folgerungen.

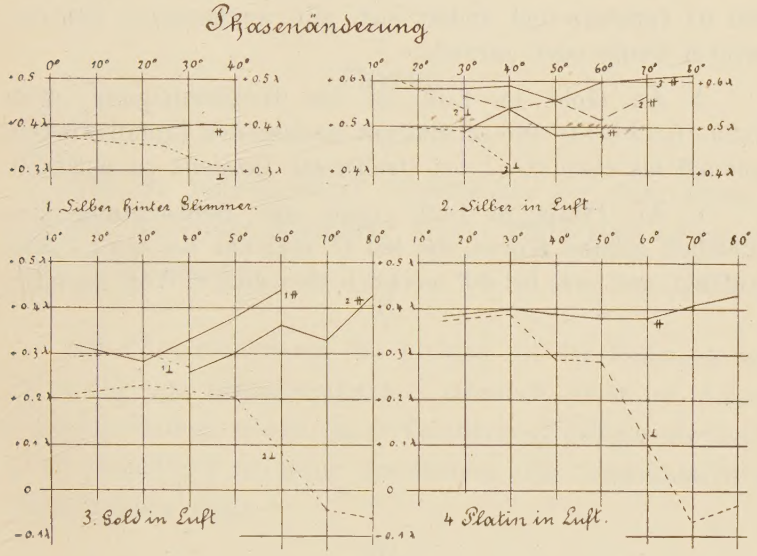
Es hat sich nach dem Vorstehenden gezeigt, dass die benutzte Methode befriedigende Resultate ergiebt, besonders da man hoffen darf, dass durch eine grössere Zahl von Beobachtungen die jetzt noch in den Hundertstel Wellenlängen ungenauen Werte mit grösserer Genauigkeit sich ergeben werden: ebenso würde es sich vielleicht für eine spätere Arbeit empfehlen, bei den grösseren Einfallswinkeln mit grösseren Dicken und also mehr Streifen zu arbeiten, da das Festhalten derselben Dicke ja nicht durchaus notwendig ist.

Das Auffallendste an den Resultaten ist gewiss der grosse Unterschied, den die Beschleunigung an Silberspiegeln, wie ich sie untersuchte, gegenüber den von Herrn Drude[1] untersuchten zeigt. Keiner der Drudeschen Werte ging über 0,43 λ bei 0^0 hinaus, während hier die Beschleunigung bei 0^0 zwischen 0,5 und 0,6 liegen würde. Ob man diesen Unterschied auf eine grössere Reinheit der Kathodenspiegel zurückführen darf, oder ob die Molekularkonstitution hier, wo sie unter dem Einfluss eines starken elektrischen Feldes sich bildete, eine andere ist als bei chemischer Reduktion, ist eine offene Frage. Interessant ist die geringe Aenderung der Beschleunigung parallel zur Einfallsebene mit dem Einfallswinkel bei Silber und Platin, während Gold im Gegenteil ziemlich starkes Zunehmen der Beschleunigung mit dem Winkel zeigt. Ebenso ist die kleinere Beschleunigung an den beiden schweren Metallen Platin und Gold gegenüber den hohen Werten des Silbers bemerkenswert.

Es darf wohl noch einmal darauf hingewiesen werden, dass jede Beobachtung ein abgeschlossenes Ganzes war,

1. Wied. Ann. Bd. 50 Seite 611. — Die obige Darstellung ist natürlich nur richtig unter der Voraussetzung, dass das P'' in Luft nicht bedeutend von dem in Glimmer abweicht (Vgl. S. 12), sodass aus dem Werte 0,43 etwa $0{,}50 = P'$ zu folgern wäre.

unabhängig von den anderen — soweit nicht die Natur des Spiegels in Frage kam — sodass die Folgerungen, wenn auch eine geringe Zahl von Spiegeln untersucht wurde, doch eine gewisse Glaubwürdigkeit verdienen.



Als neue Resultate dieser Arbeit ergeben sich also die folgenden Sätze (streng genommen für die photographische Wirkung) für Licht von etwa 0,590 bis 0,390 μ Wellenlänge.

1. Die Phasenänderung am Silber ist eine Beschleunigung. Daneben giebt es keine andere Phasenänderung, die man mit Wernicke besonderen Modifikationen des Silbers zuschreiben und als Verzögerung bezeichnen müsste. Die von Wernicke und andern beobachtete Erscheinung, welche zu dieser letzteren Erklärung Veranlass gab, ist vielmehr eine Interferenzerscheinung, erzeugt durch die verwandten dünnen Blättchen des betreffenden Metalls.

2. Setzt man weiter die Beschleunigung als gegeben durch die Formel $P = P' - \frac{1}{\lambda} P''$, so gelten für P' folgende Resultate bei parallel zur Einfallsebene polarisiertem Licht.

a. An Silber in Luft ist die Beschleunigung etwa 0,55 λ bei 0^0 Inzidenz und ändert sich mit wachsendem Einfallswinkel wenig oder garnicht.

b. An Gold in Luft ist die Beschleunigung etwa 0,25—0,3 λ bei 0^0 und scheint mit wachsenden Einfallswinkeln schnell bis etwa 0,5 λ bei streifender Inzidenz zu wachsen.

c. An Platin in Luft ergab eine Beobachtung eine ziemlich genaue Kurve, die bei 0^0 Inzidenz bei etwa 0,39 λ anfängt und erst bei 60^0 merklich über diesen Wert ansteigt.

Thesen.

I.

Für ein eingehenderes Verständnis der Naturwissenschaften ist einige Erfahrung in der Philosophie unerlässliche Vorbedingung.

II.

Die Phasenänderung des Lichtes bei der Reflexion an Silber ist eine Beschleunigung. Daneben giebt es keine Phasenänderung, welche einer Verzögerung gleichwertig und einer besonderen Struktur des Silbers (der „molekularen") zuzuschreiben wäre.

III.

Viele physikalische Vorgänge können ohne mathematische Formulierung nicht vollständig begriffen werden.

Vita.

Natus ego sum Hubertus Kath Stargardiae, in urbe Pomerana, die VIII Martii mensis anni h. s. LXXII patre Fernando, matre Amalia de gente Pauli, quos parentes adhuc superstites veneror. Fidei adscriptus sum evangelicae.

Postquam gymnasium Eberswaldense et Collegium Groeningianum Stargardiense per sex annos frequentavi, testimonium maturitatis vere anni h. s. LXXX adeptus sum. In civium universitatis Fridericae-Guilelmae Berolinensis numerum receptus cum alliis tum studiis physicis et mathematicis me dedi. Praemium illud anno h. s. LXXXXIII quaestioni cuidam physicae absolvendae propositum summus ordo philosophorum in me contulit.

In laboratoriis illustrissimorum virorum Kundt † et Rubens per quatuor semestria experimentis operam dedi. Ad colloquia de rebus physicis Kundt †, Planck et Warburg benigne me admiserunt.

Societatis mathematicae per tria semestria sodalis fui. Praeceptores mei fuerunt viri doctissimi:

Dilthey, Ebbinghaus, Erman, Fischer, Fuchs, Glan, de Helmholtz †, Hettner, Kötter, Kundt †, Kronecker †, Möbius, Paulsen, Planck, Rubens, Schlesinger, de Treitschke†.

Quibus omnibus viris gratias ago quam maximas. Imprimis autem Hermanni de Helmholtz atque Augusti Kundt me movet memoria, qui in studiis physicis mihi mature praeceptores fuerunt et quamdiu in vivis erant consiliis me saluberrimis adjuverunt.